

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 68 (1977)

Heft: 14

Artikel: Nichtphasenreine Bruchlochwicklungen mit besonders geringen Unsymmetrien

Autor: Auinger, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915052>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nichtphasenreine Bruchlochwicklungen mit besonders geringen Unsymmetrien

Von H. Auinger

621.3.045

Durch Anordnung von drei, um möglichst 120° elektrisch versetzten, nicht phasenreinen Teilwicklungen, mit zyklisch vertauscht hintereinander geschalteten Strängen gelingt eine weitestgehende Symmetrierung. Wie an mehreren Beispielen gezeigt wird, lassen sich auf diese Weise relativ einfach herstellbare Zweischichtwicklungen entwerfen, die – als Besonderheit – gruppenweise abwechselnd aus Einfach- und Doppelpulen bestehen. Vorteile sind eine wesentlich verbesserte Phasensymmetrie ohne geradzahlige und/oder subharmonische Oberfelder. Solche Wicklungen haben sich bei 6poligen Maschinen mit 24 Nuten bestens bewährt.

On peut obtenir une très bonne symétrie de phase pour une machine non symétrique lorsque l'on compose les phases de trois enroulements partiels décalés le plus près possible de 120° électriques que l'on branche en série après commutation cyclique. Comme le montrent plusieurs exemples, des enroulements en deux couches relativement simples en résultent ayant comme particularité une alternance de groupes de bobines simples et doubles. Les avantages en sont une symétrie nettement améliorée des phases, sans champs harmoniques d'ordre pair et/ou sous-harmoniques. De tels enroulements ont donné d'excellents résultats pour des machines hexapolaires à 24 encoches.

1. Einleitung

Bezeichnet man mit N die Nutenzahl, t den grössten gemeinsamen Teiler von Nutenzahl N und Polpaarzahl p und m die Strangzahl, so sind bekanntlich mehrsträngige Wicklungen, bei denen das Verhältnis N/tm keine ganze Zahl ist, grundsätzlich nicht symmetrisch ausführbar [1] ¹⁾. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Nutenzahl je Pol und Strang q ein Bruch mit einem Vielfachen der Strangzahl m als Nenner ist; für Dreiphasenwicklungen also bei allen Drittel-, Sechstel-, Neuntel-, ...-Bruchlochzahlen.

Während man beim Neuentwurf einer elektrischen Maschine solche Bruchlochwicklungen strikt zu vermeiden trachtet, müssen sie beim Umwickeln auf geänderte Polzahl, bei Verwendung vorliegender Blechschnitte und in Sonderfällen auch bei hochpoligen- oder Kleinmaschinen gelegentlich in Kauf genommen werden.

Die Kunst beim Entwerfen nichtphasenreiner Wicklungen besteht darin, Schaltungen mit möglichst geringen Unterschieden bezüglich der Wicklungsfaktoren und Phasenwinkel für die einzelnen Stränge zu finden. Naturgemäss lässt sich ein Wicklungssystem um so besser symmetrieren, je höher die Nutenzahl je Pol und Strang q ist, weil dann für jeden Wicklungsstrang eine um so grössere Zahl verschiedenphasiger Spulen zur Verfügung steht. Bei den in [1] enthaltenen Dreiphasenwicklungen unterscheiden sich z.B. die Wicklungsfaktoren um ca. 2...1%, und die Phasenwinkel weichen um max. 6,7...0,8 Winkelgrade von der Symmetrielage ab, wobei die grösseren Werte für $q = 4/3$ und die kleineren für $q = 8/3$ gelten. Derartige Wicklungen sind unabhängig von der Phasensymmetrie sowohl als Einschicht- als auch Zweischichtwicklungen ausführbar. Mit Rücksicht auf die Feldoberwelligkeit empfiehlt sich eine zweischichtige Ausbildung, wodurch insbesondere auch geradzahlige oder stärker ausgeprägte subharmonische Oberwellen, die zu verschiedenartigen Parasitäreffekten Anlass geben können, besser zu vermeiden sind.

In der vorliegenden Arbeit soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie sich durch eine spezielle zweischichtige Wicklungsausbildung besonders gute Symmetrieeigenschaften erreichen lassen.

2. Methode zur Symmetrierung dreisträngiger Wicklungen

Wie Fig. 1 zeigt, lässt sich aus einem unsymmetrischen Wicklungssystem $\underline{A}_1, \underline{B}_1, \underline{C}_1$ eine vollsymmetrische Wicklungsanordnung bilden, wenn man zwei weitere gleichartig aufgebaute Teilsysteme anordnet, deren Stränge gegenseitig um jeweils $2\pi/3$ versetzt sind und in zyklisch vertauschter Folge hintereinander geschaltet werden. Mit $\underline{a} = e^{j2\pi/3}$ als 120° -Dreher der symmetrischen Komponentenrechnung gilt für die drei Teilsysteme:

1. Teilsystem	2. Teilsystem	3. Teilsystem
\underline{A}_1	$\underline{A}_2 = \underline{C}_1 \underline{a}^2$	$\underline{A}_3 = \underline{B}_1 \underline{a}$
\underline{B}_1	$\underline{B}_2 = \underline{A}_1 \underline{a}^2$	$\underline{B}_3 = \underline{C}_1 \underline{a}$
\underline{C}_1	$\underline{C}_2 = \underline{B}_1 \underline{a}^2$	$\underline{C}_3 = \underline{A}_1 \underline{a}$

so dass wegen

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_3 = \underline{A}_1 + \underline{B}_1 \underline{a} + \underline{C}_1 \underline{a}^2 \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_3 = \underline{A}_1 \underline{a}^2 + \underline{B}_1 + \underline{C}_1 \underline{a} = \underline{A} \underline{a}^2 \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_3 = \underline{A}_1 \underline{a} + \underline{B}_1 \underline{a}^2 + \underline{C}_1 = \underline{A} \underline{a} \end{aligned}$$

das resultierende Gesamtsystem $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$ voll symmetriert ist. Die wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass sich die drei Teilsysteme auch tatsächlich um 120° elektrisch versetzt an-

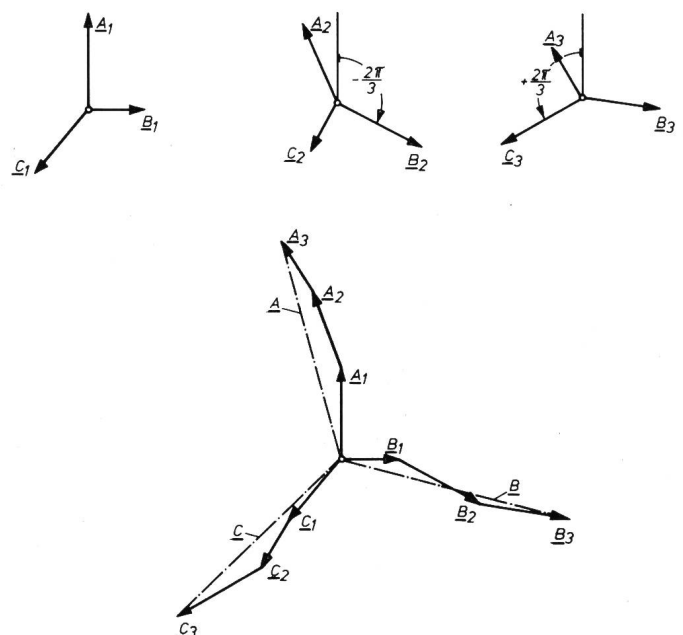


Fig. 1 Prinzip zur Symmetrierung eines unsymmetrischen Dreiphasensystems

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

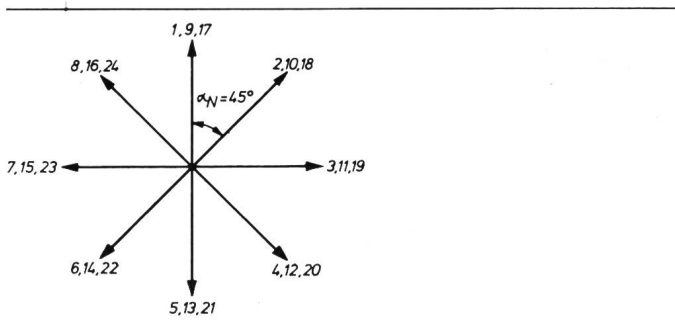


Fig. 2 Nutenstern für $N = 24$ und $2p = 6$

ordnen lassen. Hierzu ist ein dreiaxig symmetrischer Nutenstern erforderlich, wie er aber nur dann vorliegt, wenn die eingangs genannte Symmetriebedingung $N/tm = \text{ganze Zahl}$ erfüllt ist.

Bei den hier betrachteten nicht phasenreinen Wicklungen lassen sich die drei Teilsysteme zwar gleichartig ausbilden, aber nur näherungsweise um 120° elektrisch versetzen. Die resultierende Wicklungsanordnung wird daher Restunsymmetrien aufweisen, die um so kleiner sind, je besser bereits die einzelnen Teilsysteme symmetriert und je weniger der ausführbare Verschiebungswinkel vom Sollwert $2\pi/3$ abweicht.

Wie sieht nun die praktische Realisierung der Symmetrierungsmethode nach Fig. 1 aus?

Ein Übereinanderlegen von drei gleichartigen Wicklungen ist zwar prinzipiell möglich, kommt aber praktisch kaum in Frage. Erstens wegen des erheblichen Mehraufwandes beim Wickeln, Einlegen und Schalten bei der insgesamt 3fachen Spulenzahl. Zum zweiten hätten die zusätzlich erforderlichen Isolierteile im Nut- und Stirnbereich eine verringerte Kupferfüllung sowie eine verschlechterte Wärmeabfuhr und damit eine herabgesetzte Maschinenausnutzung zur Folge.

Ausgehend von Wicklungsteilsystemen, die jeweils nur $1/3$ der Nuten belegen, lässt sich hingegen diese Symmetrierungsmethode zwanglos anwenden [2]. Das erste Teilsystem belegt z. B. die Nuten 1, 4, 7..., das zweite die Nuten 2, 5, 8... und das dritte die Nuten 3, 6, 9, 12 usw. Entsprechend der auf $1/3$ verringerten Ausgangsnutenzahl ist zwar die Symmetrie jedes Teilsystems relativ schlecht, was jedoch im Zusammenwirken aller Systeme für die vollständige Wicklung wieder ausgeglichen wird. Diese Symmetrierungsmethode hat z. B. als Hilfsmittel zum Entwurf von sogenannten polamplitudenmodulierten Wicklungen, die durch Stromrichtungsumkehr in Wicklungsteilen auf mehrere Polzahlstufen umschaltbar sind, Anwendung gefunden [3; 4].

Zweckmässig können auf diese Weise auch nichtphasenreine Wicklungen entworfen werden [5], wobei man nahezu schematisch die Spulerverteilung für weitgehend symmetrierte Wicklungsstränge findet, deren Wicklungsfaktor- und Phasendifferenzen je nach q etwa die oben angegebene, aus [1] entnommene Grösse aufweisen.

3. Verbesserung der Wicklungssymmetrie

Würde man drei solcherart bereits weitgehend symmetrierte Wicklungen übereinanderlegen, die gegenseitig um möglichst 120° elektrisch versetzt sind, und deren Stränge in Reihe schalten, dann liesse sich die verbleibende Restunsymmetrie so weit verringern, dass sie in vielen Fällen praktisch nicht mehr wahrnehmbar wäre. Wie bereits ausgeführt wurde, ist jedoch das

Übereinanderlegen von drei getrennten Teilwicklungen zu aufwendig und würde auch die Maschinenausnutzung verschlechtern.

Wie in den nachfolgenden Beispielen gezeigt wird, lassen sich diese Nachteile durch eine speziell ausgebildete Zweischichtwicklung umgehen, bei der die einzelnen Wicklungsspulen abwechselnd eine im Verhältnis 1 : 2 unterschiedliche Windungszahl aufweisen. Eine solche Wicklung ist aus $N/2$ Spulen mit der einfachen Windungszahl, die jeweils nur $1/3$ des Nutquerschnittes belegen, und einer gleichen Zahl von Doppelspulen zusammengesetzt. Fertigungstechnisch bedeutet eine derartige Wicklungsausbildung keinen nennenswerten Mehraufwand gegenüber konventionellen Zweischichtwicklungen mit durchwegs gleichen Spulen. Die unterschiedlichen Schichthöhen erfordern lediglich radial und axial etwas weiter ausladende Wickelköpfe.

Die praktische Herstellung kann z. B. so erfolgen, dass man insgesamt $3N/2$ Spulen gleicher Windungszahl wickelt und beim Einlegen abwechselnd in die erste Schicht jeweils zwei zu einer Doppelspule zusammenfasst und in die zweite Schicht eine Einzelspule legt bzw. umgekehrt.

Eine derartige Spulerverteilung kann man auch als «Dreischichtwicklung» ansehen. Der Herstellungsgang ist jedoch nicht anders als bei konventionellen Zweischichtwicklungen.

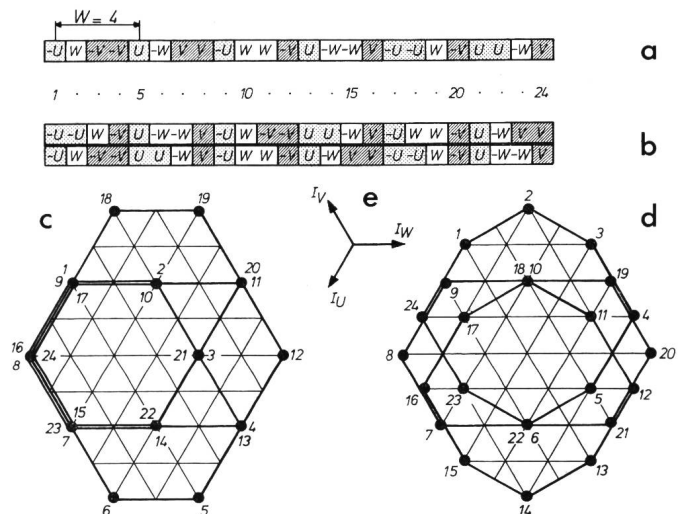


Fig. 3 Konventionelle 6polige Dreiphasenwicklungen für $N = 24$ Nuten
a, c Zonenplan und Goergespolygon für Einschichtwicklung [1]
b, d Zonenplan und Goergespolygon für Zweischichtwicklung
e Stern der Strangströme für c und d

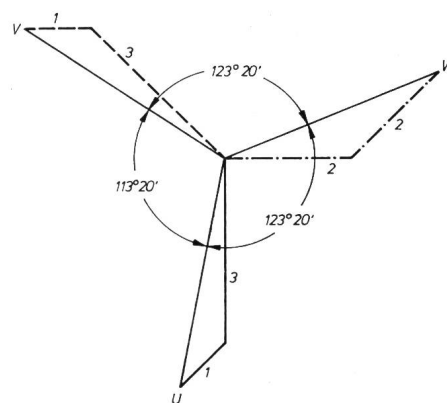


Fig. 4 Spannungssymmetrie der 6poligen Wicklung nach Fig. 3

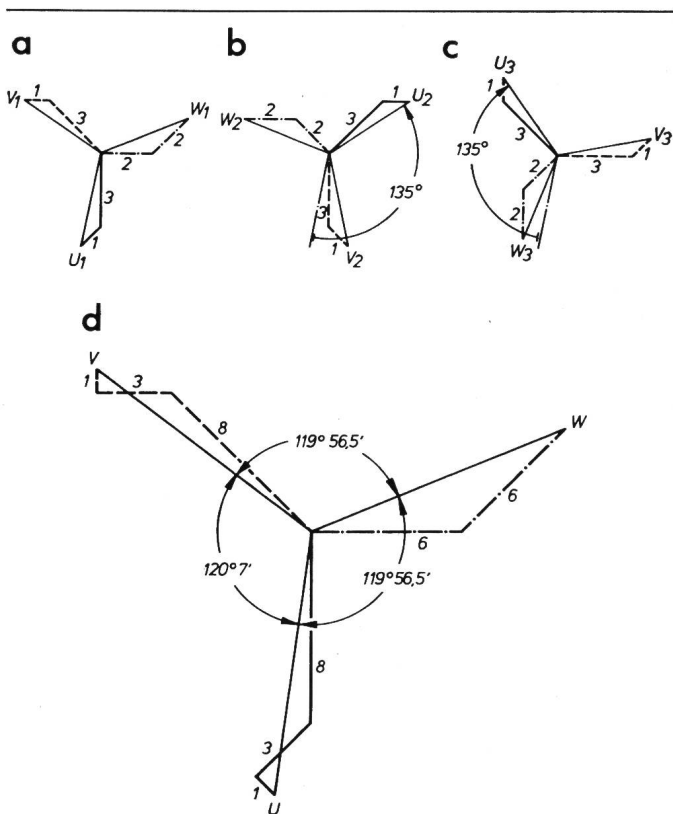


Fig. 5 Symmetrierung einer 6poligen Wicklung für $N = 24$ Nuten

- a Teilsystem
- b Teilsystem 135° nach links versetzt
- c Teilsystem 135° nach rechts versetzt
- d resultierender Spannungstern

4. Beispiele mit 6poligen Drittellochwicklungen

4.1 $q = 4/3$ Nuten je Pol und Strang

Als erstes sei eine 6polige Dreiphasenwicklung für 24 Nuten betrachtet. Der grösste gemeinsame Teiler von N und p ist $t = 3$, so dass die Symmetriebedingung $N/tm = \text{ganze Zahl}$ nicht erfüllt ist. Die Nutenzahl je Pol und Strang beträgt $q = N/2pm = 4/3$. Fig. 2 zeigt den Nutenstern, dessen Strahlen im Abstand des elektrischen Nutenwinkels $\alpha_N = 2\pi p/N = \pi/4$ aufeinanderfolgen. Die um eine Polpaarteilung (8 Nuten) entfernt liegenden Spulen sind gleichphasig, so dass im Nutenstern sich jeweils drei Vektoren überdecken. Da die einzelnen Spulen sowohl gleich- als auch gegensinnig in Reihe geschaltet werden können, sind diametral liegende Strahlen gleichwertig.

Aus den unter 45° zueinander liegenden Vektoren gemäss Fig. 2 lässt sich kein symmetrisches Dreiphasensystem bilden; hierzu müsste der Nutenstern dreiachs symmetrisch sein.

In Fig. 3 sind zunächst die Zonenpläne zweier konventioneller Ausführungsvarianten gezeigt. Die Spulenweite beträgt $W = 4$, also genau eine Polteilung. Bezüglich der Phasensymmetrie gilt für beide Varianten der in Fig. 4 gezeigte Stern der Strangspannungen.

Innerhalb jedes Stranges sind jeweils um 45° versetzte Wicklungsspulen hintereinander geschaltet, deren Zahl sich bei U und V wie 3 : 1 und beim Strang W wie 2 : 2 verhält. Die Wicklungsfaktoren errechnen sich nach dem Cosinussatz zu:

$$\xi_U = \xi_V = 1/4 \sqrt{10 + 3\sqrt{2}} = 0,943$$

$$\xi_W = 1/2 \sqrt{2 + \sqrt{2}} = 0,924$$

so dass sich die Strang-E.M.K. um etwa 2% unterscheiden. Ausserdem weichen die Phasenwinkel mit

$$\varphi_{UV} = 113^\circ 20' \text{ und } \varphi_{VW} = \varphi_{WU} = 123^\circ 20'$$

relativ stark voneinander ab, wodurch sich die Unterschiede bei den verketteten Spannungen auf rund 4% vergrössern.

Art und Grösse der bei den beiden Varianten auftretenden Feldoberwellen lassen sich aus den in Fig. 3c und 3d gezeigten Goergespolygonen erkennen. Diese Polygone sind Polardigramme der treppenförmigen Felderregerkurven [6]. Ihre Abweichungen von der idealen Kreisform sind ein Mass für die auftretende Feldoberwelligkeit. Der sich jeweils erst nach drei Umläufen schliessende Polygonzug deutet auf eine ausgeprägte 2polige Unterwelle hin. Aus einer fehlenden Polarsymmetrie erkennt man, dass daneben bei der Einschichtwicklung auch

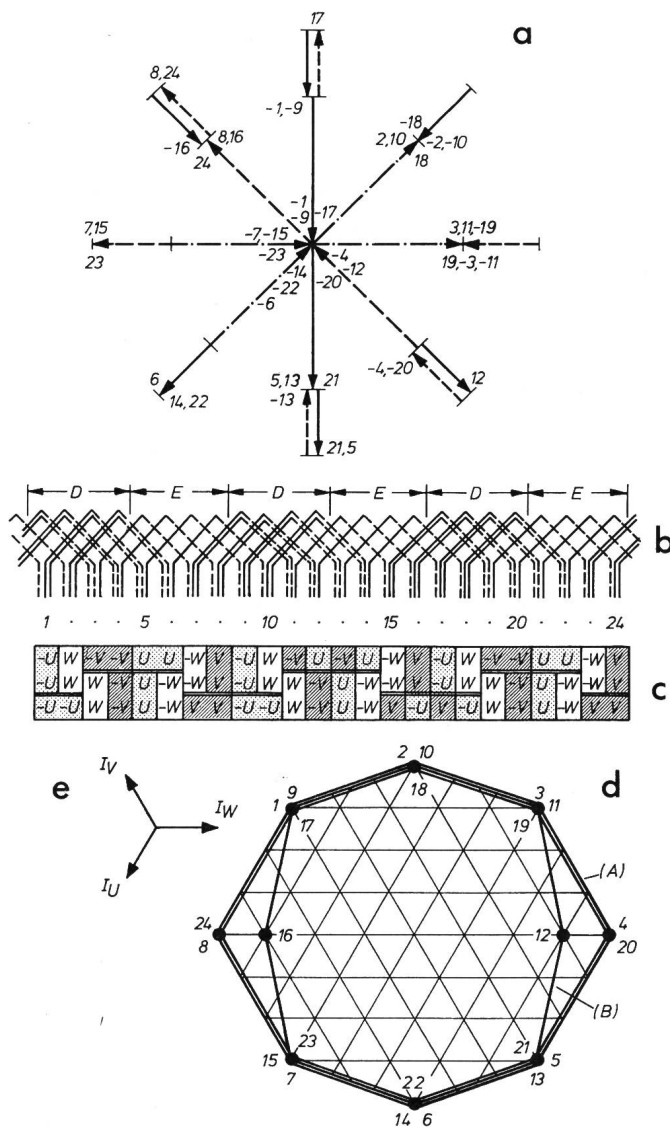
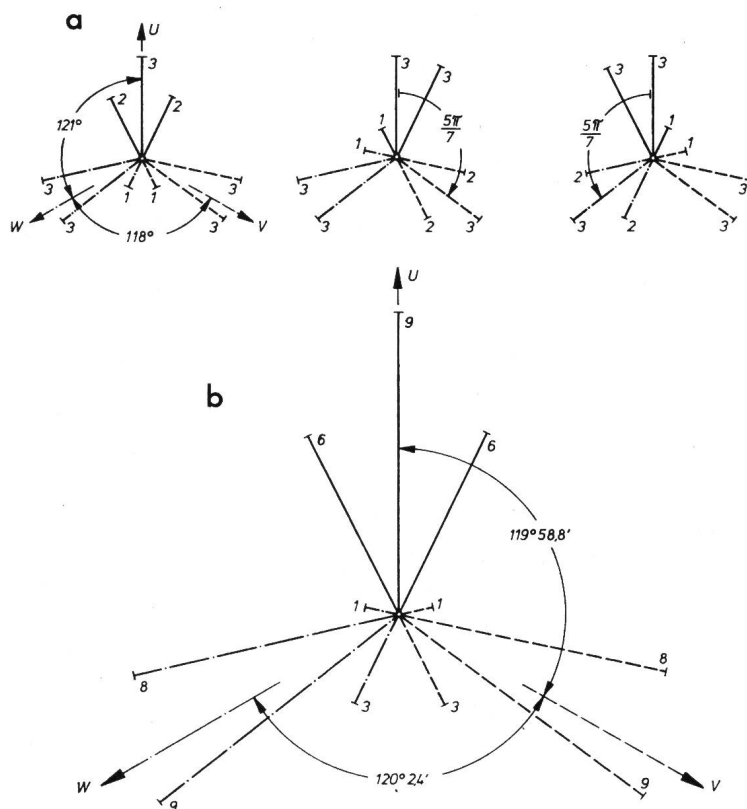


Fig. 6 6polige Dreiphasenwicklung für $N = 24$ Nuten mit besonders guter Symmetrie

- a Spulenseitenstern
- b Spulenanordnung mit gruppenweisen Einfach (E)- und Doppelspulen (D)
- c Zonenplan
- d Goergespolygon
- e Stern der Strangströme für d

Fig. 7
Verbesserung der Phasensymmetrie einer 6poligen Wicklung für $N = 42$ Nuten

a Teilsysteme
 b Resultierendes Strahlenbündel



geradzahlige Harmonische angeregt werden. Die Polygone sind nicht dreiaxig symmetrisch; ein Zeichen für die fehlende Strangsymmetrie.

Wie erläutert wurde, lässt sich die Spannungssymmetrie durch Zusammensetzen dreier Teilsysteme nach Fig. 4 erheblich verbessern. Der dem Sollwert von 120° nächstliegende ausführbare Verschiebungswinkel beträgt $3\alpha_N = 135^\circ$ (Fig. 5). Durch zyklisch vertauschtes Zusammensetzen der drei Teilstränge erhält man den in Fig. 5d gezeigten resultierenden Strangspannungstern. Während Strang W unverändert aus zwei um 45° versetzten Wicklungshälften zusammengesetzt ist, werden nunmehr die Wicklungsstränge U und V aus drei verschiedenachsigen Teilen gebildet, deren Windungszahlen sich wie 8 : 3 : 1 verhalten. Die Wicklungsfaktoren sind mit

$$\xi_U = \xi_V = 1/12 \sqrt{(8 + 2\sqrt{2})^2 + 2} = 0,910 \text{ und } \xi_W = 0,924$$

auf 1,5% angeglichen; die Phasenwinkelabweichungen von maximal 7' sind praktisch nicht mehr wahrnehmbar, und die verketteten Spannungen unterscheiden sich nur noch um 0,7%.

Die Aufteilung der verschiedenachsigen Wicklungsspulen im Verhältnis 8 : 3 : 1 beziehungsweise 6 : 6 erfordert für jeden Strang 12, insgesamt also 36 Wicklungselemente, was durch eine Zweischiichtwicklung mit abwechselnden Einfach- und Doppelspulen erreicht wird. In jeder Nut kommen dabei abwechselnd in Ober- und Unterschicht die Spulenseiten je einer Doppel- und Einfachspule zu liegen. Es sind also bei $N = 24$ Nuten je 12 Einfach- und 12 Doppelspulen vorhanden. Das kleinste Wicklungselement ist eine Einfachspule, so dass insgesamt die erforderliche Zahl von 36 Wicklungselementen zur Verfügung steht.

Die Zuordnung der einzelnen Spulen zu den drei Strängen findet man am zweckmässigsten mit Hilfe des Spulenseitensternes (Fig. 6a). Analog zum Nutenstern in Fig. 2 entspricht

in Fig. 6a jeder Spulenseite ein Strahl, wobei die Doppel- und Einfachspulen durch verschiedene Längen unterschieden sind. Die Zugehörigkeit zu den drei Strängen ist durch volle, gestrichelte und strichpunktierte Vektoren angedeutet. Die Pfeilspitzen weisen auf die Durchlaufrichtung der Spulen hin.

Charakteristisch für diese Wicklung ist die in Fig. 6b ange deutete zweischichtige Spulenanordnung mit in Umfangsrichtung gruppenweise abwechselnden Doppel (D)- und Einfachspulen (E). Aus dem Zonenplan, Fig. 6c, ist ersichtlich, dass durchwegs je 4/3 Nuten pro Pol und Strang belegt sind. Hieraus erklärt sich auch die aus dem Goergespolygon, Fig. 6d, erkennbare besonders gute Feldform. Zwei Polpaare sind gleich gruppiert; dem entspricht der zweifach durchlaufene äussere Polygonzug (A). Beim 3. Polpaar sind in den Nuten 12, 13 bzw. 16, 17 jeweils zwei Einzelspulen der Stränge U und V vertauscht angeordnet, wie es zur Erzielung der verbesserten Phasensymmetrie nach Fig. 5 erforderlich ist. Hierdurch ergibt sich der innere Polygonzug (B). Würde man die Spulenteilung durchwegs gleich gemäss dem 1. Polpaar (Nuten 1...8) belassen, dann bliebe die Phasensymmetrie gemäss Fig. 4 unverändert; verbessert wäre lediglich die Feldform entsprechend dem äusseren Polygonzug (A) in Fig. 6d.

Die in Fig. 6 gezeigte Wicklung wurde bereits 1965 entworfen [7] und bei einem 5-kVA-Synchrongenerator für 150 Hz, 3000 U/min, praktisch erprobt. Ursprünglich war diese Maschine mit einer herkömmlichen Zweischiichtwicklung nach Fig. 3b ausgerüstet, wobei sie ein starkes magnetisches Brummgeräusch entwickelte, das, wie sich herausstellte, von der 2poligen Unterwelle angeregt wurde. Mit der neuen Wicklung ergaben sich keinerlei störende magnetische Geräusche bzw. Schwingungen.

Neben dem Einsatz bei kleineren Synchrongeneratoren hat sich diese 6polige Wicklung für 24 Nuten auch bei Kurzschlussläufermotoren bestens bewährt.

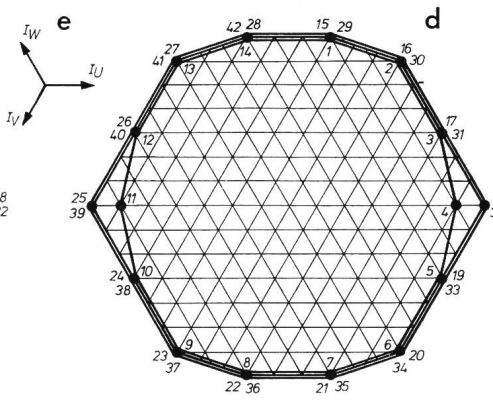
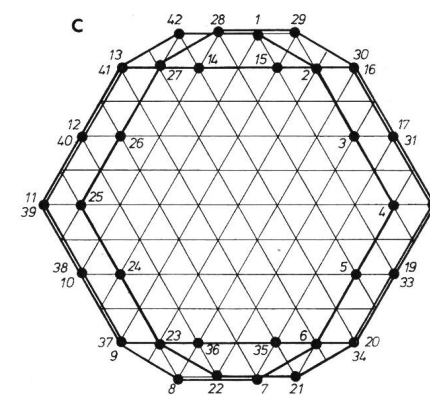
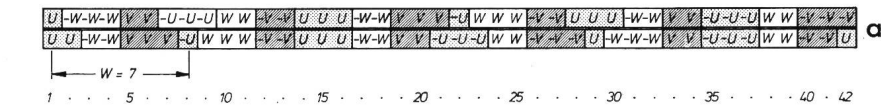


Fig. 8
6polige Dreiphasenwicklung
für $N = 42$ Nuten
 a, c Zonenplan und Goergespolygon bei konventioneller zweischichtiger Ausbildung
 b, d Zonenplan und Goergespolygon bei verbesserter Symmetrie mit Doppel- und Einfachspulen
 e Stern der Strangströme für c und d

4.2 $q = 7/3$ Nuten je Pol und Strang

Als zweites Beispiel soll die Symmetrie der in [2] und [5] angegebenen 6poligen Dreiphasenwicklung für $N = 42$ Nuten verbessert werden. Fig. 8a zeigt den Zonenplan für eine ungesehnte zweischichtige Wicklungsausbildung; in Fig. 8c ist das zugehörige Goergespolygon dargestellt. Der Nutenstern dieser Wicklung ist 14strahlig. Die den einzelnen Wicklungssträngen zugehörigen Spulen bilden das in Fig. 7a links gezeigte Strahlenbündel, wonach jeder Strang aus drei verschiedenachsigen Teilen besteht, deren Windungszahlen sich bei U wie 2 : 3 : 2 und bei V und W wie 3 : 3 : 1 verhalten. Mit

$$\xi_U = 1/7 (3 + 4\cos \pi/7) = 0,9434$$

$$\xi_V = \xi_W = 1/7 \sqrt{(3 + 4\cos \pi/7)^2 + 4\sin^2 \pi/7} = 0,9515$$

und $\varphi_{UV} = \varphi_{UW} \approx 121^\circ$ $\varphi_{VW} \approx 118^\circ$

ist die Symmetrie bereits recht gut.

Wie in Fig. 7 ausgeführt ist, lässt sich durch das Zusammenfügen von drei derartigen Teilsystemen, die jeweils um $5\pi/7$

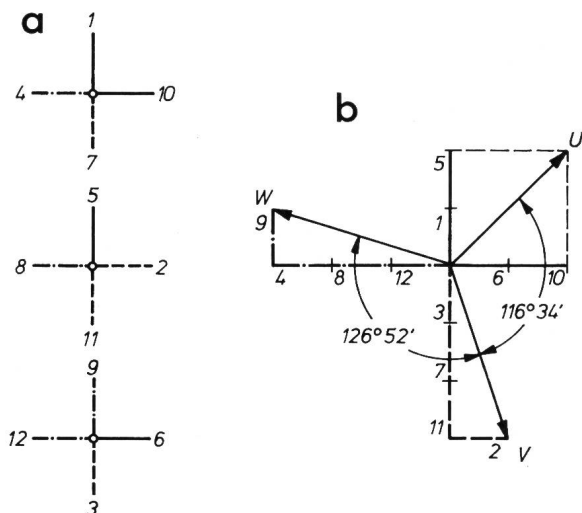


Fig. 9 Nutensterne der drei Teilwicklungen und resultierende Strangspannungen einer 6poligen Dreiphasenwicklung für $N = 12$ Nuten

gegeneinander verschoben sind, eine wesentliche Verbesserung erreichen, wobei gemäss dem resultierenden Strahlenbündel (Fig. 7b) die Wicklungsfaktoren mit

$$\xi_U = 0,94341 \text{ und } \xi_V = \xi_W = 0,94075$$

nur mehr um $2,8\%$ differieren und die maximale Phasenwinkelabweichung nur noch $2,4'$ ausmacht.

Die praktische Realisierung einer solchen Wicklung mit Einfach- und Doppelspulen geht aus dem Zonenplan, Fig. 8b, hervor. In Ober- und Unterschicht wechseln gruppenweise nach je 7 Nuten die Spulenseiten von Einfach- und Doppelspulen ab. Die Spulenweite beträgt mit $W = 7$ Nutteilungen genau eine Polteilung. Die besonders gute Feldform dieser Wicklung wird aus dem Vergleich der Goergespolygone, Fig. 8c und 8d, deutlich. Wie beim vorigen Beispiel sind zwei Polpaare identisch gruppiert. Das 3. Polpaar unterscheidet sich lediglich dadurch, dass je zwei Einzelspulen der Stränge V und W vertauscht sind, und zwar ist dies bei den Nuten 4, 5 und 11, 12 der Fall, in denen jeweils Spulenseiten zu liegen kommen, die im resultierenden Strahlenbündel (Fig. 7b) als kleinste Wicklungselemente mit Länge 1 erscheinen.

4.3 $q = 2/3$ Nuten je Pol und Strang

Dieses Beispiel einer 6poligen Wicklung für nur 12 Nuten soll verdeutlichen, dass sich auch bei extrem niedriger Nutenzahl eine beachtenswert gute Phasensymmetrie erreichen lässt.

Anhand der Nutensterne (Fig. 9a) findet man zunächst die Aufteilung für eine üblich ausgebildete Wicklung nach [2] und [5]. Jeder Stern umfasst jeweils nur $1/3$ der Nuten. Die Strahlen sind fortlaufend so beziffert, dass Nut 1 beim ersten, Nut 2 beim zweiten, Nut 3 beim dritten und Nut 4 wieder beim ersten Stern usw. zu liegen kommt. Aus 4 rechtwinkligen Strahlen lässt sich ein nur sehr unvollkommen symmetriertes Dreiphasensystem bilden. Durch zyklisch vertauschtes Zusammenfügen von drei solchen, jeweils um $\pi/2$ versetzten Teilsystemen wird ein resultierendes Dreiphasensystem mit Phasenwinkeln $126^\circ 52'$ und $116^\circ 34'$ und unterschiedlichen Strangwicklungs-

faktoren von $\xi_V = \xi_W = 0,7906$ und $\xi_U = 0,707$ (Fig. 9b) erreicht.

Aufbauend darauf wird mit drei derartigen, wiederum um $\pi/2$ zueinander versetzten Teilsystemen (Fig. 10a), die Symmetrie erheblich verbessert, wobei gemäss Fig. 10b die Wicklungsfaktoren mit $\xi_U = 0,707$ und $\xi_V = \xi_W = 0,687$ nur noch um 2,9% und die Phasenwinkel um $+58'$ bzw. $-1^\circ 56'$ von der Symmetrielage abweichen.

Während Strang U im Verhältnis 6 : 6 aus Wicklungsteilen mit horizontaler und vertikaler Phasenlage zusammengesetzt ist, sind die beiden anderen Stränge V und W im Verhältnis 8 : 3 : -1 aufgeteilt. Je 2 Wicklungsteile der Einheit 1 wirken einander entgegen und können daher weggelassen werden. Resultierend verbleiben dann bei V und W je 10 im Verhältnis 8 : 2 auf die beiden Achsen aufgeteilte Wicklungselemente.

Die reale Wicklungsausbildung mit insgesamt 6 Doppel- und 4 Einfachspulen geht aus Fig. 11b und 11c hervor. Die Nuten 3, 4 und 5, 6 sind jeweils nur zu $2/3$ gefüllt. Die Spulenweite entspricht einer Polteilung und beträgt $W = 2$. Fig. 12a zeigt links unten das Goergespolygon und die für 4 charakteristische, jeweils um $1/12$ -Periode auseinanderliegende Zeitpunkte daraus ermittelten augenblicklichen Felderreggerkurven.

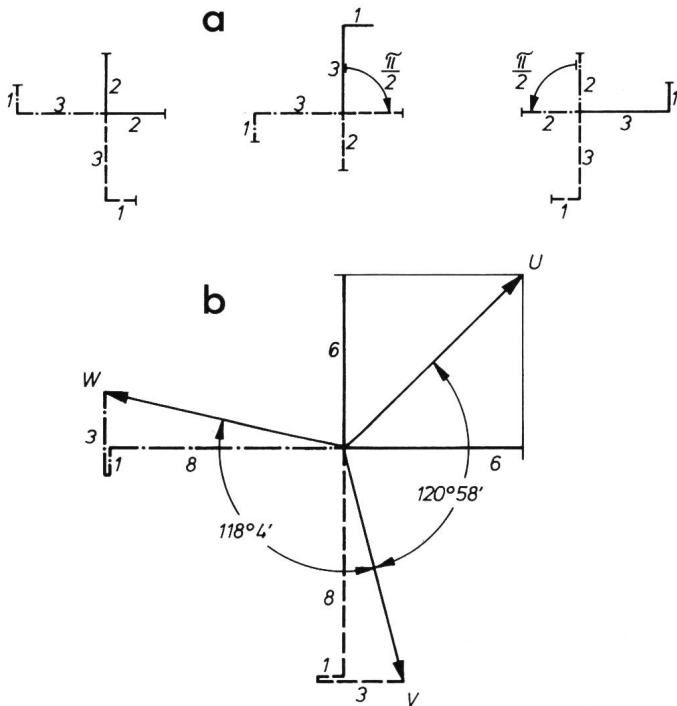


Fig. 10 Verbesserung der Phasensymmetrie für $2p = 6$ und $N = 12$

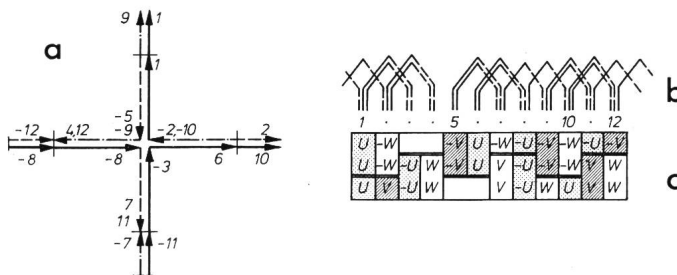


Fig. 11 Praktische Ausbildung der besser symmetrischen 6poligen Dreiphasenwicklung für $N = 12$ Nuten

- a Spulenseitenstern
- b Spulenanordnung mit Doppel- und Einfachspulen
- c Zonenplan

Naturgemäss ist infolge der sehr geringen Nutenzahl die Oberwelligkeit relativ stark. Trotzdem erscheint diese Wicklung für Kleinmaschinen durchaus brauchbar.

5. Andere Polzahlen

Bei den 6poligen Wicklungen nach Fig. 6 und 8b sind jeweils 2 Polpaare gleich gruppiert (A). Das dritte Polpaar (B) unterscheidet sich durch 2 in vertauschter Folge zugeordnete Einzelspulen. Dementsprechend ergibt sich in den Goergespolygonen, Fig. 6d und 8d, der äussere und innere Linienzug.

In Fig. 13 sind für $q = 4/3$ die Wicklungszonen der unterschiedlich gruppierten Polpaare (A) und (B) noch einmal gesondert dargestellt. Aus den unterhalb eingezeichneten Strahlenbüscheln ist die Phasensymmetrie ersichtlich, die sich ergeben würde, wenn nur das betrachtete Polpaar allein vorhanden wäre. Bei (A) ist bereits innerhalb eines Polpaares die gleiche Symmetrie vorhanden wie bei einer konventionellen Wicklung nach Fig. 3 insgesamt über alle 3 Polpaare. Die Gruppierung (B) ist, für sich allein betrachtet, ungünstiger. Ihre Phasenwinkelabweichungen sind, dem Betrage nach, mehr als doppelt so gross, allerdings im entgegengesetzten Sinn. Die besonders gute Phasensymmetrie gemäss Fig. 5 ergibt sich

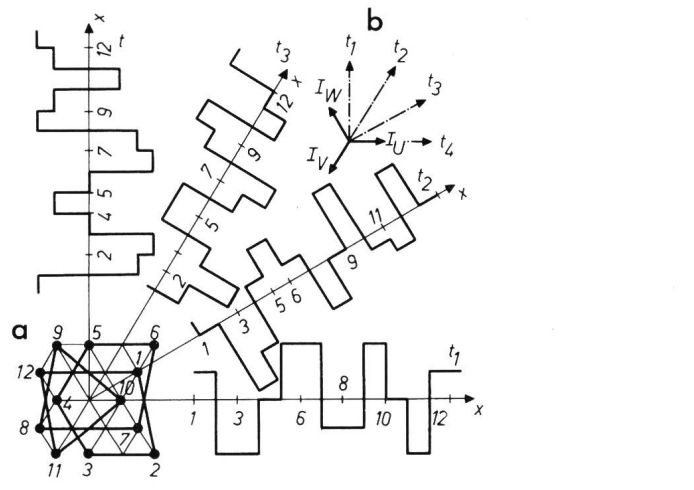


Fig. 12 6polige Dreiphasenwicklung für $N = 12$ Nuten

- a Goergespolygon und augenblickliche Felderreggerkurven für vier jeweils um $T/12$ auseinanderliegende Zeitpunkte $t_1 \dots t_4$
- b Stern der Strangströme und Lage der Zeitachsen für $t_1 \dots t_4$

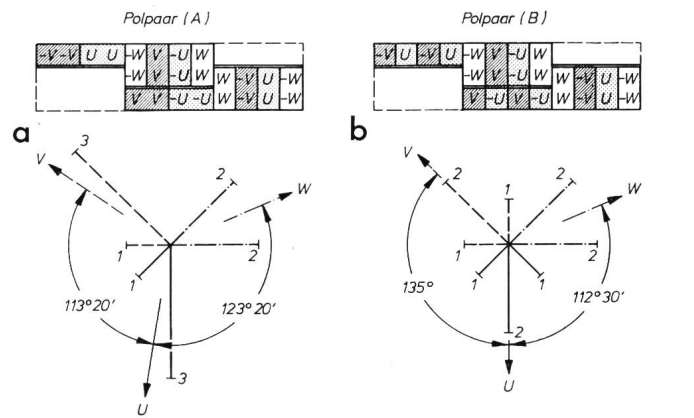


Fig. 13 Unterschiedlich gruppierte Polpaare (A) und (B) bei $q = 4/3$ Nuten je Pol und Strang

- a Polpaar (A): $\xi_U = \xi_V = 0,9435$; $\xi_W = 0,9239$
- b Polpaar (B): $\xi_U = \xi_V = 0,8536$; $\xi_W = 0,9239$

Polzahl $2p$	Nutenzahl N	Zusammen- setzung der p Polpaare	Aufteilung in verschiedenachsige Wicklungsteile		Symmetrie der drei Stränge			
			Strang U, V	Strang W	Wicklungsfaktoren		Phasenwinkel	
					$\xi_U = \xi_V$	ξ_W	$\varphi_{UV} = \varphi_{VW}$	φ_{UV}
2	8	(A)	3 : 1	2 : 2	0,9435	0,9239	123° 20'	113° 20'
4	16	(A) + (B)	5 : 2 : 1	4 : 4	0,8945	0,9239	118° 10'	123° 40'
6	24	2 (A) + (B)	8 : 3 : 1	6 : 6	0,9100	0,9239	119° 56,5'	120° 7'
8	32	2 (A) + 2 (B)	10 : 4 : 2	8 : 8	0,8945	0,9239	118° 10'	123° 40'
		3 (A) + (B)	11 : 4 : 1	8 : 8	0,9181	0,9239	120° 48'	118° 24'
10	40	3 (A) + 2 (B)	13 : 5 : 2	10 : 10	0,9037	0,9239	119° 14,5'	121° 31'
		4 (A) + (B)	14 : 5 : 1	10 : 10	0,9230	0,9239	121° 19'	117° 22'
12	48	4 (A) + 2 (B)	16 : 6 : 2	12 : 12	0,9100	0,9239	119° 56,5'	120° 7'
14	56	5 (A) + 2 (B)	19 : 7 : 2	14 : 14	0,9146	0,9239	120° 26'	119° 8'
16	64	5 (A) + 3 (B)	21 : 8 : 3	16 : 16	0,9061	0,9239	119° 30'	121°
		6 (A) + 2 (B)	22 : 8 : 2	16 : 16	0,9181	0,9239	120° 48'	118° 24'
18	72	6 (A) + 3 (B)	24 : 9 : 3	18 : 18	0,9100	0,9239	119° 56,5'	120° 7'
		7 (A) + 2 (B)	25 : 9 : 2	18 : 18	0,9208	0,9239	121° 5'	117° 50'

im Zusammenwirken von zwei Polpaaren (A) mit einem Polpaar (B).

Da die Polpaare (A) und (B) in beliebiger Zahl und Folge aneinandergesetzt werden können, lassen sich sämtliche Polzahlen ausführen. Tabelle I enthält eine Zusammenstellung von sinnvollen Kombinationsmöglichkeiten für $q = 4/3$ Nuten je Pol und Strang bei Polzahlen von $2p = 2 \dots 18$. Bei $2p = 2$ ist nur Polpaar (A) vorhanden; ansonsten werden beide Polpaare (A) und (B) in der jeweils angegebenen Zahl verwendet. Der Stern der Strangspannungen ist dabei analog zu Fig. 5d bei U und V aus drei verschiedenphasigen Teilen zusammengefügt, deren Relation in Tab. I angegeben ist. Strang W besteht in allen Fällen aus zwei um 45° versetzten Hälften. Die erreichte Phasensymmetrie ist durchwegs recht gut.

Die Feldform entspricht jeweils dem in Fig. 6d dargestellten Goergespolygon, wobei die äusseren und inneren Polygonschleifen so oft durchlaufen werden, wie Polpaargruppierungen (A) und (B) vorhanden sind.

6. Praktische Verwendbarkeit

Wie für $q = 4/3$ dargelegt wurde, lassen sich in analoger Weise andere Drittellochwicklungen, z.B. mit $q = 5/3, 7/3, 8/3 \dots$, für beliebige Polzahlen ausführen. Ferner sind derartige Wicklungen mit Einzel- und Doppelspulen auch zur Symmetrierung von Sechstel-, Neuntel-...-Lochwicklungen geeignet.

Die bei nichtphasenreinen Bruchlochwicklungen prinzipiell vorhandenen Unterschiede in den Wicklungsfaktoren und Phasenwinkeln verursachen bei Speisung aus dem symmetrischen Netz unsymmetrische Strangströme. Das Drehfeld wird elliptisch und enthält auch Nullkomponenten [8]. Bei Dreieckschaltung können innere Ausgleichsströme auftreten, die zusätzliche Verluste zur Folge haben.

Wie eine Abschätzung zeigt, sind die hier vorgeschlagenen Drittellochwicklungen oft so gut symmetriert, dass diese Auswirkungen nicht grösser sind als jene, die auch bei voll symmetrischen Wicklungen infolge Fertigungsungenauigkeiten oder Materialeigenschaften auftreten können. Geringfügig unterschiedliche Strangströme und Zusatzfelder werden z.B. auch durch örtliche Luftspaltschwankungen, Anisotropie der Bleche sowie Widerstände und Reaktanzen der Schaltverbindungen verursacht.

Durch den praktischen Einsatz der 6poligen Wicklung für 24 Nuten nach Fig. 6 bei mehreren Maschinen wurde bestätigt, dass solche Wicklungen eine echte Alternative zu den üblichen Ganz- oder Halblochwicklungen darstellen. Sie weisen neben einer weitestgehenden Phasensymmetrie relativ saubere Felderregerkurven auf, deren Oberwelligkeit insgesamt nicht grösser ist, als bei symmetrischen Wicklungen für benachbarte Nutenzahlen. Diese günstigen Eigenschaften erlauben es, solche Wicklungen nicht nur beim nachträglichen Umrüsten eisenfertiger Maschinen auf andere Polzahlen, sondern bereits von vornherein vorzusehen. Man hat hierdurch wesentlich mehr Freizügigkeiten bei der Wahl der Nutenzahl, was insbesondere die Bemessung höherpoliger Maschinen bedeutend erleichtert.

Literatur

- [1] H. Sequenz: Die Wicklungen elektrischer Maschinen. Bd. 1: Wechselstrom-Ankerwicklungen. Wien, Springer-Verlag, 1950.
- [2] W. Fong: Polyphase symmetrisation. A new method für the design of electrical machine windings. Proc. IEE 115(1968)8, p. 1123...1134.
- [3] G. H. Rawcliffe: Residual unbalance in symmetrised windings. Proc. IEE 121(1974)7, p. 657...662.
- [4] A. R. W. Broadway: Part symmetrisation of 3-phase windings. Proc. IEE 122(1975)2, p. 145...148.
- [5] H. Sequenz: Eine neue Art der Auslegung von Bruchlochwicklungen. E und M 86(1969)12, S. 551...553.
- [6] F. Heller und W. Kauders: Das Goergesche Durchflutungspolygon. Arch. Elektrotechn. 29(1935)9, S. 599...616.
- [7] Siemens AG, Berlin und München, und H. Auinger: Drehstrom-Bruchlochwicklung mit $q = 1\frac{1}{3}$ Nuten pro Pol und Phase. Deutsche Patentschrift 1 488 735 vom 5. Juli 1973.
- [8] C. v. Dobbeler: Unsymmetrische Drehstromwicklungen. ETZ 72(1951)7, S. 203...206.

Adresse des Autors

Dipl. Ing. Herbert Auinger, Siemens AG, Unternehmensbereich Energietechnik, Nürnberger Maschinen- und Apparatewerk, Postfach 2443, D-8500 Nürnberg 1.